Environment Canada Environnement Canada

National Hydrology Research Institute

NHRI PAPER NO. 41
IWD SCIENTIFIC SERIES NO. 165

Phosphorus Control of Algal Production and Biomass in the Thompson River, British Columbia

M.L. Bothwell, S. Jasper and R.J. Daley

NHRI

INLAND WATERS DIRECTORATE
NATIONAL HYDROLOGY RESEARCH INSTITUTE
NATIONAL HYDROLOGY RESEARCH CENTRE
SASKATOON, SASKATCHEWAN, 1989
(Disponible en français sur demande)

89-05533/

Published by authority of
the Minister of the Environment

© Minister of Supply and Services Canada 1989

Cat. No. En 36-502/165E

ISBN 0-662-16946-8

Contents

	Page
ABSTRACT	v
RÉSUMÉ	vi
ACKNOWLEDGMENTS	vii
HISTORICAL BACKGROUND	1
RESULTS AND DISCUSSION	2
Periphytic diatom growth rates	2
Phosphorus control of algal biomass	3
Seasonality of phosphorus limitation	5
Prediction of algal response to phosphorus control measures	6
REFERENCES	8
GLOSSARY	9

Illustrations

Figure 1.	Map showing the location of the experimental troughs research apparatus near the outlet of Little Shuswap Lake in south-central British Columbia	2
Figure 2.	Growth rate of South Thompson River diatoms in divisions per day vs. added phosphate concentration at different temperatures	3
Figure 3.	Relative specific growth rate of South Thompson River diatoms vs. added phosphate concentration at different temperatures	3
Figure 4.	Time-course curves of the periphyton biomass at different phosphate additions during a long-term experiment	4
Figure 5.	Sustainable algal biomass in response to phosphate addition during the three long-term experiments	4
Figure 6.	Relative sustainable algal biomass in response to phosphate additions up to 100 ppb during a long-term experiment	4
Figure 7.	Seasonal changes in relative specific growth rates and alkaline phosphatase activity in the South Thompson River periphyton algae	5
Figure 8.	Relative specific growth rates of algae throughout the year at low levels of phosphate addition	6

Illustrations (Cont.)

Page

Figure 9. Dilution of the kraft mill effluent in the Thompson River assuming a steady effluent discharge rate, and streamflow data for the Thompson River at Spences Bridge ... 6

Figure 10. Downstream increases in soluble reactive phosphorus due to the discharge of kraft mill effluent to the Thompson River 7

Figure 11. Sustainable algal biomass during high phosphorus limitation period in response to phosphorus additions from the kraft mill effluent 7

Figure 12. Curve showing, on a percentage basis, the expected decline in algal biomass as a function of the percentage reduction in soluble available phosphorus from the pulpmill effluent 8

Abstract

The first phase of the experimental trough research program undertaken jointly by the Inland Waters Directorate of Environment Canada and Weyerhaeuser Canada Ltd. during 1980–81 established that the higher algal biomass levels in the Thompson River downstream from Kamloops Lake were caused by phosphorus originating from point source discharges near Kamloops. These early experimental comparisons of algal growth rates in the North, South and lower Thompson rivers indicated that at soluble reactive phosphorus concentrations of 3–4 ppb, periphytic algae in the lower Thompson River were growing at or near the maximum rate possible during the critical late winter—early spring period.

The second phase of the program consisted of extensive controlled phosphorus addition experiments conducted at Chase, B.C., during 1984–86. These experiments have conclusively established that the growth rates of periphytic diatoms in the Thompson River saturate at very low phosphate concentrations (at less than 1 ppb). Long-term algal biomass accumulation experiments, also conducted at the Chase experimental site, have shown that the maximum biomass of algae attained in flowing water also shows saturation kinetics. However, the concentration of phosphate required to saturate the sustainable standing crop of periphytic diatoms is considerably higher (about 30 ppb) than that which saturates cellular growth rate. In spite of continued algal biomass response with higher levels of P-addition, the shape of the biomass saturation curve means that a one-for-one, removal of phosphorus vs. reduction of algae is not expected.

Assuming that the average concentration of readily available phosphorus in the lower Thompson River is elevated by the pulpmill effluent by about 2.5 ppb during the low flow period, it is possible to predict roughly the downstream response in algal biomass that might result from a given percentage reduction in P-loading. Using data on the maximum sustainable algal biomass in response to phosphate additions, a simple analysis indicates that a 50% reduction in phosphorus from the mill effluent would result in less than a 20% improvement downstream. To achieve a "significant" improvement downstream, i.e., a 60% reduction in algal biomass, at least 90% of the available soluble phosphorus in the effluent would have to be removed. This finding suggests that additional efforts to control downstream algae by removing phosphorus from the pulpmill effluent would be relatively ineffective. Furthermore, recent observations that the "nuisance" levels of algae reported in the 1970's are no longer present suggest that additional nutrient control measures in the future may not even be necessary.

Résumé

La première phase du programme de recherche en canal expérimental, réalisée conjointement par la Direction générale des eaux intérieures d'Environnement Canada et Weyerhaeuser Canada Ltd. en 1980–1981, a permis d'établir que les niveaux élevés de la biomasse algale dans la rivière Thompson en aval du lac Kamloops étaient attribuables à la présence de phosphore provenant de sources locales de déversement près de Kamloops. Ces premières comparaisons expérimentales des taux de croissance des algues dans les rivières Thompson nord et sud, ainsi que dans la partie inférieure de la rivière, ont indiqué qu'à des concentrations de phosphore réactif soluble de 3–4 ppb, les algues périphytoniques dans la partie inférieure de la rivière croissaient pratiquement au taux maximal possible pendant la période critique de la fin de l'hiver et du début du printemps.

Dans la seconde phase du programme, menée à Chase (C.-B.) au cours de la période 1984–1986, on a effectué des expériences détaillées sur des additions contrôlées de phosphore. Ces expériences ont clairement démontré que les taux de croissance des diatomées périphytoniques dans la rivière Thompson atteignent le point de saturation à des concentrations très faibles de phosphate (moins de 1 ppb). Des expériences sur l'accumulation de la biomasse algale à long terme, aussi réalisées au site expérimental de Chase, ont montré que la biomasse algale maximale atteinte dans des eaux en écoulement présente également une cinétique de saturation. Toutefois, la concentration de phosphate requise pour mener au point de saturation la culture sur pied durable de diatomées périphytoniques est de beaucoup supérieure (environ 30 ppb) à celle qui sature le taux de croissance cellulaire. Malgré la réponse continue de la biomasse algale à l'augmentation des niveaux d'addition de phosphore, la forme de la courbe de saturation de la biomasse montre qu'on ne peut s'attendre à ce qu'il existe une relation biunivoque entre l'extraction du phosphore et la réduction de la quantité d'algues.

En supposant que la concentration moyenne de phosphore directement disponible dans la partie inférieure de la rivière Thompson est accrue par l'effluent de l'usine de pâte à papier d'environ 2.5 ppb pendant la période de faible débit, on peut prévoir approximativement la réponse, en aval, de la biomasse algale qui pourrait résulter d'un pourcentage donné de réduction de la charge en phosphore. Une simple analyse des données sur la biomasse algale maximale pouvant être maintenue en réponse à des additions de phosphate révèle qu'une réduction de 50 % du phosphore provenant de l'effluent de l'usine procurerait une amélioration de moins de 20 % en aval. Pour obtenir une amélioration <<significative>> en aval, c'est-à-dire une réduction de 60 % de la biomasse algale, il faudrait extraire au moins 90 % du phosphore soluble disponible dans l'effluent. Ce résultat montre qu'il ne serait pas rentable de déployer des efforts additionnels pour extraire le phosphore de l'effluent de l'usine, dans l'intention de lutter contre la formation d'algues en aval. En outre, selon des observations faites récemment, le degré de <<nuisance>> des algues qu'on signalait dans les années 1970 n'est plus le même aujourd'hui, de sorte qu'il ne serait peut-être même pas nécessaire de prendre d'autres mesures de contrôle des éléments nutritifs dans l'avenir.

Acknowledgments

This project was jointly funded by Environment Canada and Weyerhaeuser Canada Ltd. Technical support was provided by M. Bolin, R. Mitchell and K. Suzuki. The site for these experiments was kindly provided by the Village of Chase, British Columbia. The administrative support and encouragement of L. Adamache are gratefully acknowledged.

Phosphorus Control of Algal Production and Biomass in the Thompson River, British Columbia

M.L. Bothwell, S. Jasper and R.J. Daley

HISTORICAL BACKGROUND

Following commencement of operations at the Weyerhaeuser Canada Ltd. pulpmill in Kamloops in the late 1960's, numerous complaints from both the general public and fisheries biologists about water quality degradation problems in the Thompson River below Kamloops Lake were voiced. The three primary areas of concern were (1) taste and odour problems in the fish flesh, (2) colouring and foaming in the river, and (3) massive accumulations of algal slime on the rocks. A federal-provincial Task Force established in 1973 to address these questions concluded that the first two concerns either were not well supported by sound scientific facts or were primarily of an aesthetic nature, i.e., they did not appear to be of major ecological importance. The algal growth problem, however, was well documented scientifically and was potentially a risk for both fishermen (slippery rocks) and fish (intragravel oxygen depletion). The Task Force's final report in 1976 identified phosphorus loadings from both the Weyerhaeuser pulpmill and the City of Kamloops municipal sewage discharges as responsible for the high levels of algae in the lower Thompson River. Therefore, in 1976, the City of Kamloops began practising winter holdback and tertiary treatment of their effluent. These actions effectively reduced by at least one-half the point source phosphorus loadings to the Thompson River. Although the algal blooms below Kamloops Lake diminished somewhat in the late 1970's and early 1980's, the problem still persisted.

The Task Force presented strong and compelling evidence that phosphorus was the cause of the algal infestations. However, the arguments were indirect and circumstantial. In 1976, there was no evidence available to prove directly whether the periphytic algae in the Thompson River downstream from the P-inputs were physiologically more phosphorus-rich or were in fact actually growing faster than algae at upstream locations. These two central questions required answers before a reasonably conclusive judgement could be made that the algal slime accumulations in the lower Thompson River in the early 1970's were the result of point source P-loadings from the Kamloops area.

In 1979, experiments were proposed to answer these two key questions. An agreement for a jointly funded research project between Environment Canada's National Water Research Institute and Weyerhaeuser Canada Ltd. was reached in the fall of 1979. The research conducted during the winters of 1980 and 1981 involved the use of experimental troughs located on the banks of the North, South and lower Thompson rivers. These troughs simultaneously compared algal growth rates and phosphorus physiology in the three rivers under controlled physical conditions (Bothwell and Daley, 1981; Bothwell, 1983; Bothwell and Jasper, 1983; Bothwell, 1985). The results of these experiments confirmed the conclusion of the 1976 Task Force report, i.e., that phosphorus was in fact responsible for the excessive algal accumulations in the Thompson River. They showed for the first time that (1) soluble phosphorus concentrations downstream from Kamloops Lake were consistently higher than in the two upstream tributaries and (2) the periphyton algae downstream were physiologically responding to the higher phosphorus levels and were growing faster.

In spite of the strong connection established between P-loading and the algal problem downstream, it was still not possible in the early 1980's to predict the amount of improvement (reduction in algal biomass) to expect from a given reduction in the loading. (The one obvious exception to this would be if anthropogenic P-loading were to be eliminated entirely. In this case, the improvement would be 100%, i.e., all other factors being equal downstream, amounts of algae should be no different than before the advent of the cultural enrichment.) One reason for the difficulty in predicting downstream response to partial P-removal is that the

relationship between algal growth and phosphorus concentration in flowing waters is a rectangular hyperbola. Similar saturation curves characterize most types of biological responses. A cost-benefit analysis for removal of phosphorus from the Weyerhaeuser Canada pulpmill first required that the shape of these curves be established. To this end another agreement for cooperative rese ch was negotiated between Environment Canada and Weyerhaeuser Canada Ltd. in 1983. This new contract funded sophisticated phosphorus addition experiments conducted between 1984 and 1986 at the experimental troughs research apparatus (EXTRA) near Chase, British Columbia (Fig. 1).

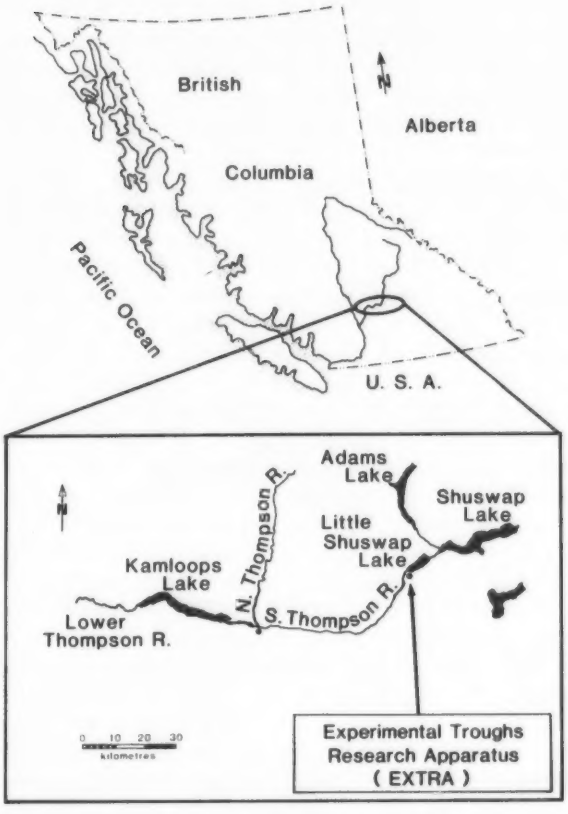

Figure 1. Map showing the location of the experimental troughs research apparatus (EXTRA) near the outlet of Little Shuswap Lake in south-central British Columbia.

This report summarizes the main findings of this final phase of the research project on phosphorus control of algal production and biomass in the Thompson River. Only those experiments and data germane to assessing the efficacy of tertiary treatment (P-removal) of the Weyerhaeuser Canada effluent, as a means of ameliorating the Thompson River algal "problem" downstream from Kamloops Lake, will be presented. A glossary of the technical terms frequently used in this report is provided at the back.

RESULTS AND DISCUSSION

Periphytic Diatom Growth Rates

One of the primary conclusions from the intersite comparison experiments conducted in 1980–81 was that growth rates of periphytic diatoms saturate at low phosphate concentrations (Bothwell, 1985). This conclusion was drawn on the basis of a limited number of observations and without precise knowledge of what the actual concentration of orthophosphate was in the rivers. Nevertheless, based largely on physiological evidence [alkaline phosphatase activity (APA), cellular N:P and C:P ratios], algae in the lower Thompson River appeared to be growing at or near maximal rates even though soluble reactive phosphorus levels were only 3–4 ppb.

This conclusion from the earlier research has now been confirmed and proven to be correct beyond any reasonable doubt. In fact, the levels of phosphate that saturate specific growth rate are much lower than previously expected. In ten separate experiments during 1984–1985 using enrichment levels of 0.1, 0.2, 0.5, 1.0, 2.0 and 5.0 ppb of orthophosphate-P, the specific growth rates (μ = divisions per day) of the algal communities always saturated at less than 1.0 ppb (Bothwell, 1988). The rectangular hyperbolic nature of the growth rate vs. phosphorus concentration curves at different times of year is clearly apparent (Fig. 2). While all curves saturate at low phosphorus concentrations, the maximum growth rate (μ_{max}) at different times of year varied. The seasonal differences in the maximum rate are largely determined by temperature, i.e., at higher temperatures, growth rates with elevated levels of phosphorus are higher (Fig. 2).

If the specific growth rates are normalized to μ_{max} in each experiment and plotted against phosphate concentration, all the curves appear to be the same throughout the year (Fig. 3). The fact that the relative specific growth ($\mu:\mu_{max}$) response of algae to P-enrichment is similar year-round reaffirms that normalizing μ to μ_{max} factors out the major effects of physical factors controlling growth rate.

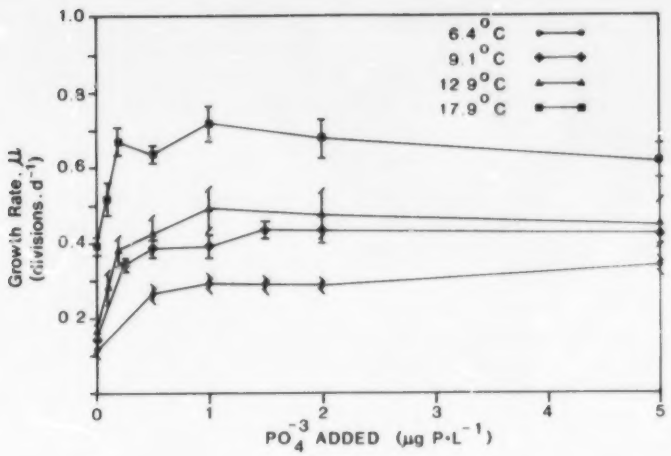

Figure 2. Growth rate (μ) of South Thompson River diatoms in divisions per day vs. added phosphate concentration at different temperatures (i.e., different times of year).

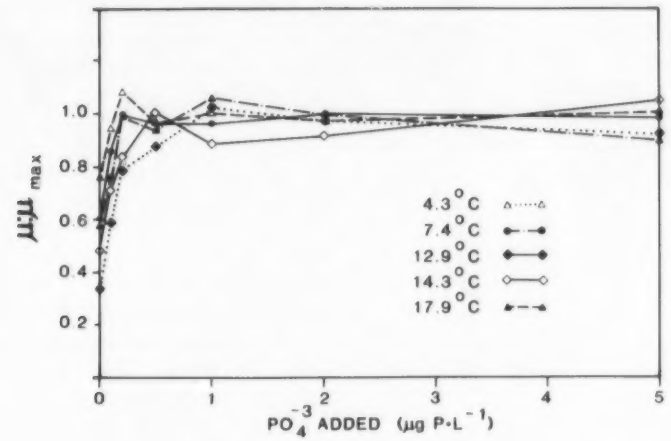

Figure 3. Relative specific growth rate (μ:μ_{max}) of South Thompson River diatoms vs. added phosphate concentration at different temperatures (i.e., different times of year).

Phosphorus Control of Algal Biomass

Most of the experiments have focused on the effect of phosphorus on algal growth rates. The reason for this was the belief that the only way for a nutrient like phosphorus to affect changes in the biomass of algae in a river was to do so by altering their growth rates. Still, the primary motivation for this study was to find out how phosphorus influenced algal biomass. To test this directly, three long-term studies were conducted to determine how areal algal biomass in flowing troughs would be influenced by phosphorus concentration and to see whether this relationship differed substantially from the phosphorus-growth rate relationships.

Figure 4 shows the time-course changes in algal biomass during one of the long-term (59 days) experiments (Oct.–Dec. 1984). In these trials, biomass increased exponentially for a period of about two weeks, reached a plateau, and then, if the experiment was long enough, began to decline. The relationship between P-concentration and areal biomass was assessed in two different ways. First, nutrient levels were related to sustainable biomass (SB). For each P-addition of every experiment, SB was estimated by averaging the higher Chl *a* values

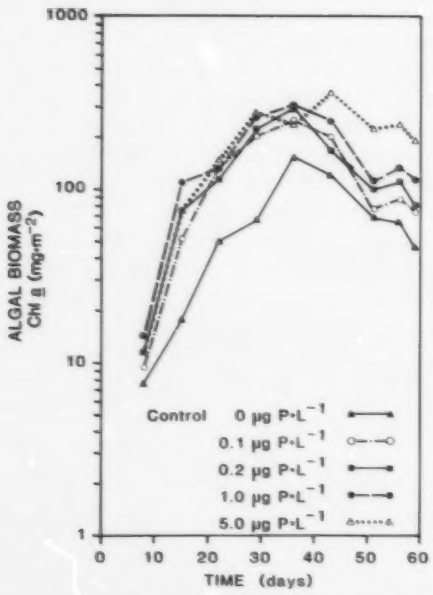

Figure 4. Time-course curves of the periphyton biomass at different phosphate additions during a long-term experiment (Oct.–Dec. 1984).

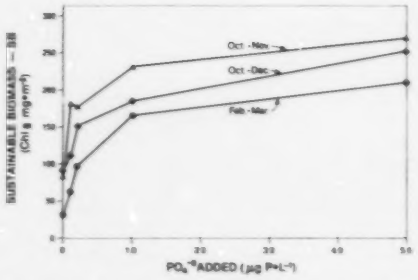

Figure 5. Sustainable algal biomass (SB) in response to phosphate addition during the three long-term experiments.

toward the end of each experiment. The highest SB value observed in each experiment was termed the maximum sustainable biomass, SB_{max}, which was used to normalize the other values.

For the second approach, nutrient levels were related to only the peak biomass (PB) observed in each treatment. The highest PB in each experiment was termed the maximum peak biomass, PB_{max}. The responses of $SB:SB_{max}$ and $PB:PB_{max}$ to P-enrichment were similar. For this reason and the sake of simplicity, only the SB data will be presented in this report.

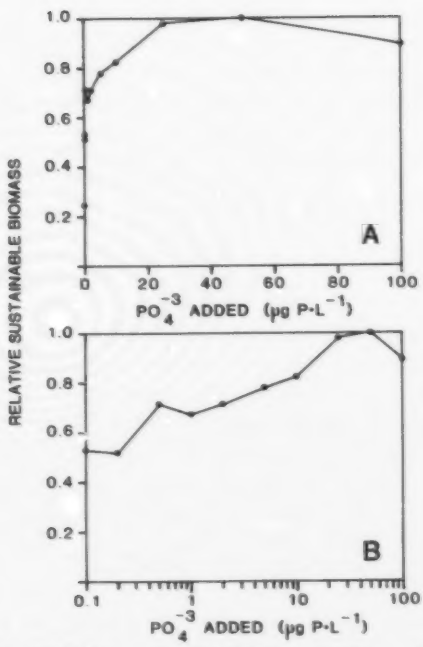

Figure 6. Relative sustainable algal biomass ($SB:SB_{max}$) in response to phosphate additions up to 100 ppb during a long-term experiment (Oct.–Nov. 1985). *A* — Phosphate additions are plotted on a linear scale. *B* — The same data is in *A*, but the phosphate values are plotted on a log-scale.

The validity of the SB vs. P-concentration experiments is strengthened by the fact that the SB curves show saturation at higher P-levels (Fig. 5). As with the plots of specific growth rate, different curves were obtained at different times of year. The SB curves, however, differ from the specific growth rate curves in one very important respect: they do not saturate at low phosphorus levels. Biomass continues to increase up to 5 ppb and beyond. In one experiment (Oct.–Nov. 1985), where concentrations of phosphate-P all the way to 100 ppb were used, biomass continued to respond up to 25–50 ppb (Fig. 6A). When these same data are plotted on a semi-log scale (Fig 6B), a log-linear relationship between phosphorus concentration and SB is apparent, with saturation occurring near 30 ppb.

There is a simple explanation for the disparity between saturating P-concentrations for $\mu:\mu_{max}$ and $SB:SB_{max}$ While growth rates of individual cells and thin periphyton films saturate at low phosphorus concentrations, growth of the community as a whole does not. As algal accumulations become more dense, cells within the mat may become P-limited, while those closer to the surface of the periphyton

matrix remain P-replete. Hence, higher concentrations of phosphorus in the overlying water should augment growth rates of cells deeper in the matrix by increasing the supply rate of the limiting nutrient.

Seasonality of Phosphorus Limitation

The response of $\mu:\mu_{max}$ to P-additions shown in Figure 3 appears to be the same year-round, suggesting that the background concentrations of dissolved phosphorus in the South Thompson River do not vary seasonally. This is at odds with measurements taken in 1980–81 of soluble reactive phosphorus (SRP) and total dissolved phosphorus (TDP) in the Thompson River system as well as periphyton APA data, all of which indicated lower amounts of available phosphorus during the spring than in the winter (Bothwell and Daley, 1981; Bothwell, 1985). Although SRP concentrations in the South Thompson at Chase during 1984–85 showed no seasonal change (Bothwell, 1988), the APA data did show distinct temporal trends consistent with the earlier observations, indicating much higher phosphorus deficiency during the late winter through summer than during the fall and early winter (Fig. 7).

A paradox is perceived when a comparison is made between Figure 3, which suggests that the background level of available phosphorus in the South Thompson River is constant throughout the year, and Figure 7, in which the APA data indicate exactly the opposite. This is the result of the scale on which the data in Figure 3 are plotted. The relative growth rate responses to the addition of very low levels of phosphate in fact differ throughout the year. This is clearly shown in Figure 8. Here the $\mu:\mu_{max}$ values for 1984–85 are shown for only the control and the lowest levels of P-addition. The relative specific growth rate of algae in the control trough (with no phosphorus added) varies seasonally. Maximum values, indicating low phosphorus deficiency, occur during fall and midwinter, while low values (high phosphorus deficiency) are present in early spring through summer. When the algae are not very P-limited, the addition of very small amounts of phosphate (less than 0.1 ppb) results in growth rate saturation. Under more phosphorus limited conditions, additions of 0.5 ppb phosphate are needed to saturate growth rates (Fig. 8). This means that background levels of readily available phosphorus in the South Thompson River vary seasonally (Bothwell, 1988). Data from the earlier 1980–81 intersite comparison (Bothwell and Daley, 1981; Bothwell, 1985) suggested similar seasonal changes occur in the North Thompson River as well. This information is important in determining those times of the year when river algae will respond the most to P-loading.

APA data from the control algae can be used as an indicator of the degree of phosphorus deficiency in the river. Taking values of less than 100 nmoles·μg^{-1} Chl a·h^{-1} as being indicative of low P-deficiency, the period from approximately October through January would show less response to P-loading than at times of the year when APA exceeds 100, i.e., from roughly February through August (Fig. 8). The exact timing of these periods may vary from year to year, but the general pattern probably remains the same.

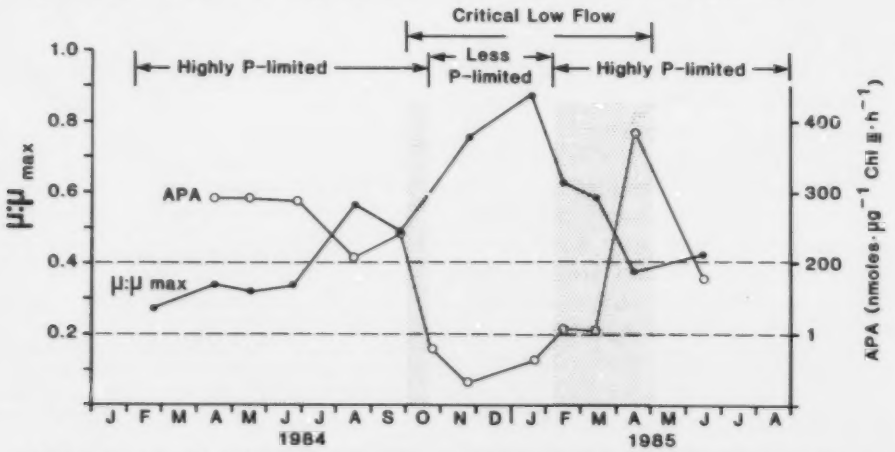

Figure 7. Seasonal changes in relative specific growth rates and alkaline phosphatase activity (APA) in the South Thompson River periphyton algae. The critical low flow period of the year and the times of high phosphorus deficiency are outlined. Shaded areas mark those times of the year when these two conditions overlap.

Another major factor affecting algal accumulation in rivers is water flow. Usually, algae in the Thompson River accumulate and become a problem only during periods of low, stable flow. Furthermore, at low flows the elevation in P-concentration from point source loadings is higher by virtue of lower dilution. The critical low flow period in the Thompson River is normally from October through April (Fig. 7). The time intervals when critical low flow coincides with periods of high phosphorus deficiency are indicated by the shaded areas in Figure 7. There are two periods each year when the river is most sensitive to phosphorus pollution: one, a short period in fall (October), and another longer period from February through April.

Prediction of Algal Response to Phosphorus Control Measures

The amount of algae on rocks in the river is the main issue for environmental managers concerned with nutrients and eutrophication. For this reason and because of the discrepancy between the response of specific growth rate and sustainable biomass to P-addition, only the SB curves are used for predictive purposes.

Different SB curves were obtained at different times of the year (Fig. 5). Because the river is more sensitive to P-loading when it is more P-deficient, the SB data set from the period of high P-limitation has been used to predict the potential lowering of algal biomass in the river resulting from P-removal from the Weyerhaeuser Canada discharge. This should liberally estimate the influence of phosphorus loading on the river at other times of the year.

Prerequisite to estimating the effect of potential reductions of phosphorus loadings to the river is knowledge of what the present discharge is adding. Figure 9 shows the calculated dilution curve of the

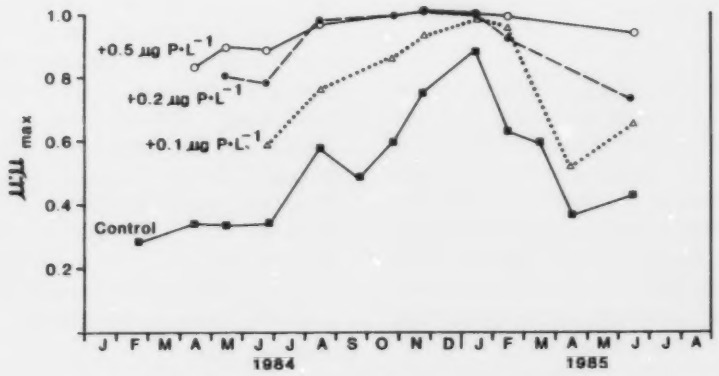

Figure 8. Relative specific growth rates of algae throughout the year at low levels of phosphate addition.

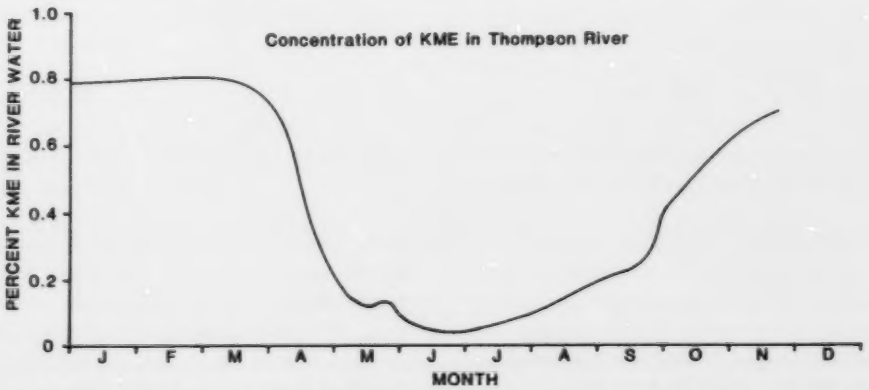

Figure 9. Dilution of the kraft mill effluent (KME) in the Thompson River assuming a steady effluent discharge rate of 1.68 $m^3 \cdot s^{-1}$, and streamflow data for the Thompson River at Spences Bridge.

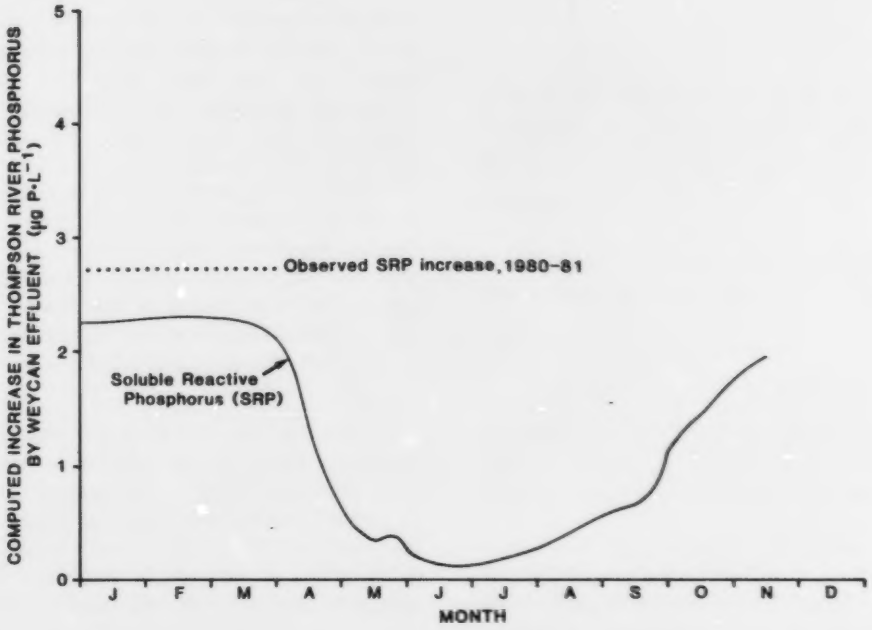

Figure 10. Downstream increases in soluble reactive phosphorus (SRP) due to the discharge of kraft mill effluent to the Thompson River. Computations assume the dilution curve in Figure 9 and an average SRP content of the effluent of 300 ppb.

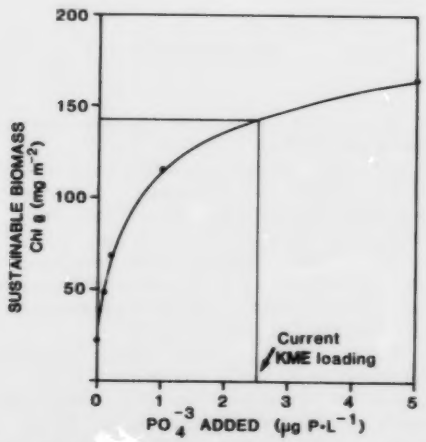

Figure 11. Sustainable algal biomass during high phosphorus limitation period (Feb.–Mar.) in response to phosphorus additions from the kraft mill effluent (KME). The algal biomass resulting from the current KME loading is shown.

kraft mill effluent (KME) in the Thompson River using an assumed constant effluent discharge of 1.68 $m^3 \cdot s^{-1}$ (J. Zagar, Weyerhaeuser Canada Ltd., pers. comm.) and mean monthly flow data for the Thompson River at Spences Bridge from Environment Canada data. Estimates of the concentrations of readily available dissolved phosphorus in the KME from both chemical measurements and radiobioassays are around 300 ppb (Jasper and Bothwell, 1986). Using values of 300 ppb for the SRP content of the KME and the dilution curve in Figure 9, the calculated increase in available soluble phosphorus concentration in the Thompson River is shown in Figure 10. The computed increases in SRP during low flow closely match the increases observed in the lower Thompson River during the winter of 1980–81 (Fig. 10; Bothwell, 1985). Keeping in mind the variation and measurement errors in all of these parameters, as well as the many simplifying assumptions made in this computation, the best estimate is that during annual low flow the present KME discharge elevates the SRP content of the Thompson River by approximately 2.5 ppb.

SB data from the long-term biomass accumulation experiment run during the period of higher P-limitation (Feb.–Mar. 1984) are plotted in Figure 11, with the data points connected by a smooth curve. Here it can be seen that at present

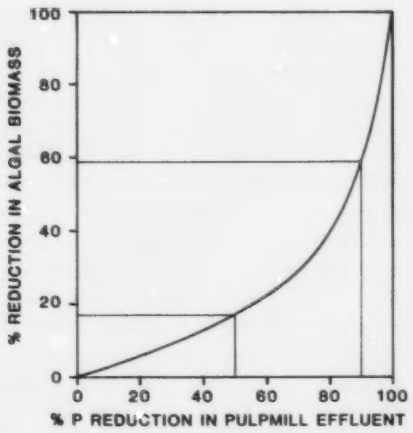

Figure 12. Curve showing, on a percentage basis, the expected decline in algal biomass as a function of the percentage reduction in soluble available phosphorus from the pulpmill effluent.

KME loading levels, the sustainable algal biomass is increased from 22.3 mg Chl $a \cdot m^{-2}$ to 142.4 mg Chl $a \cdot m^{-2}$. Taking these two values as the natural background level and the present elevated level of algae due to the current P-loading from the KME discharge, respectively, it is possible to calculate the relative improvement from known reductions in the loading. A graphic presentation of this computation is shown in Figure 12. A 50% reduction in the soluble-P output of the pulpmill would be expected to result in less than a 20% reduction in algal biomass downstream. To elicit a major reduction in downstream biomass, i.e. a 60% decrease in algae, would require a 90% reduction in the current P-loading of SRP from the KME.

There are many assumptions made in these computations, not the least of which is the validity of extrapolating from experimental troughs to a whole river ecosystem. Some of the conditions during experiments at EXTRA would tend to overestimate the influence of nutrients. Most important in this category is the low grazing pressure exerted on algal biomass in the troughs relative to what probably occurs in the river. Other key assumptions would underestimate the effect of phosphorus. The most important of these is the implicit acceptance that downstream declines in dissolved phosphorus are minimal (Bothwell and Daley, 1981). If significant declines do occur, the river will be more sensitive to P-loading than Figure 12 would indicate.

In spite of the above qualifications, the present attempt to predict the environmental consequences of an altered nutrient loading regime to a river is based on the best scientific data available. Wherever possible, environmentally conservative estimates have been used. For example, it was assumed that the background phosphorus levels at the point of mill discharge to the Thompson River are as low as those of the South Thompson River near Chase. However, the data from 1980–81 indicated that the background levels of the North Thompson are higher than those of the South Thompson, so the combination of the two rivers must have higher levels than the southern tributary alone.

Another important factor relevant to making decisions about future nutrient control measures on the Thompson River is the general observation that in recent years the massive algal accumulations common in the 1970's are no longer occurring. While there is no readily apparent explanation for this, it is possible that the invertebrate communities in the river have adapted to the new higher levels of production and are now better able to keep algal biomass under control. More detailed studies on the invertebrate communities in the river might provide an answer to this important question.

REFERENCES

Bothwell, M.L. 1983. All-weather troughs for periphyton studies. Water Res., 17: 1735–1741.

Bothwell, M.L. 1985. Phosphorus limitation of lotic periphyton growth rates: An intersite comparison using continuous-flow troughs (Thompson River system, British Columbia). Limnol. Oceanogr., 30: 527–542.

Bothwell, M.L. 1988. Growth rate responses of lotic periphytic diatoms to experimental phosphorus enrichment: The influence of temperature and light. Can. J. Fish. Aquatic. Sci., 45: 261–270.

Bothwell, M.L., and R.J. Daley. 1981. Determination of phosphorus sufficiency and growth rates of benthic algae in the Thompson River, B.C. using experimental flowing troughs. IWD Regional report. 32 pp.

Bothwell, M.L., and S. Jasper. 1983. A light and dark trough methodology for measuring rates of lotic periphyton settlement and net growth: An evaluation through intersite comparison. *In* Periphyton of freshwater ecosystems. R.G. Wetzel, ed. Junk. pp. 253–265.

Jasper, S., and M.L. Bothwell. 1986. Effects of kraft pulp mill effluent on periphyton in experimental continuous-flow troughs (Thompson River, British Columbia). Unpub. rep.

Glossary

alkaline phosphatase activity (APA): An enzyme produced by many microbial cells in response to phosphorus deficiency. A high level means the cells are P-deficient and a low level means they are P-replete.

chlorophyll (Chl *a*): A plant pigment used to quantify the amount of algae.

maximum specific growth rate (μ_{max}): The maximum division rate for cells under the restraints imposed by the physical environment, e.g., temperature and light. At this growth rate, the cells are not limited by any nutrient and are growing as fast as biologically possible.

maximum sustainable biomass (SB_{max}): The highest sustainable biomass value as a function of enrichment observed in each experiment was termed the maximum sustainable biomass and was used to normalize the other values.

orthophosphate: The molecular form of phosphorus that is most readily used by microorganisms.

relative specific growth rate ($\mu:\mu_{max}$): An index of how nutrient deficient the cells are. Their specific growth rate (μ) divided by the maximum specific growth rate (μ_{max}) under the existing physical conditions.

soluble reactive phosphorus (SRP): Those forms of dissolved phosphorus in water that are measured by standard chemical techniques not using digestion. Most of this is presumed to be orthophosphate.

specific growth rate (μ): The number of divisions per day of a microbial cell. This is a measure of how fast the cells are growing and is independent of how many there are.

sustainable biomass (SB): The highest chlorophyll values at the end of each experiment were averaged and used as a measure of the maximum amount of algae that could exist per unit surface area under the experimental conditions.

Environnement Canada Environment Canada

Institut national de recherche en hydrologie

RAPPORT Nº 41 DE L'INRH
ÉTUDE Nº 165, SÉRIE SCIENTIFIQUE DE LA DGEI

Régulation de la production et de la biomasse algales par le phosphore dans la rivière Thompson, Colombie-Britannique

M.L. Bothwell, S. Jasper et R.J. Daley

INRH

DIRECTION GÉNÉRALE DES EAUX INTÉRIEURES
INSTITUT NATIONAL DE RECHERCHE EN HYDROLOGIE
CENTRE NATIONAL DE RECHERCHE EN HYDROLOGIE
SASKATOON (SASKATCHEWAN) 1989
(Available in English on request)

Publié avec l'autorisation
du ministre de l'Environnement

© Ministre des Approvisionnements et Services Canada 1989

N° de cat. En 36-502/165F

ISBN 0-662-95521-8

Table des matières

Page

RÉSUMÉ v

ABSTRACT vi

REMERCIEMENTS vii

HISTORIQUE 1

RÉSULTATS ET DISCUSSION 2
Taux de croissance des diatomées périphytoniques 2
Régulation de la biomasse algale par le phosphore 4
Caractère saisonnier de la carence en phosphore 5
Prévision de la réaction des algues à la déphosphoration 7

RÉFÉRENCES 9

GLOSSAIRE 10

Illustrations

Figure 1. Emplacement des canaux expérimentaux aménagés près de l'émissaire du lac Little Shuswap, dans le centre-sud de la Colombie-Britannique 2

Figure 2. Taux de croissance des diatomées de la rivière South Thompson exprimé en divisions par jour en fonction de l'enrichissement en phosphate à différentes températures 3

Figure 3. Taux de croissance spécifique relatif des diatomées de la rivière South Thompson en fonction de l'enrichissement en phosphate à différentes températures 3

Figure 4. Courbes de la biomasse périphytonique en fonction du temps à différents régimes d'enrichissement en phosphate, dans l'une des expériences à long terme 4

Figure 5. Biomasse algale viable en fonction de l'enrichissement en phosphate au cours des trois expériences à long terme 4

Figure 6. Biomasse algale viable relative en fonction de l'enrichissement en phosphate (jusqu'à 100 ppb) durant une des expériences à long terme 5

Figure 7. Changements saisonniers du taux de croissance spécifique relatif et de l'activité phosphatasique alcaline des algues périphytoniques de la rivière South Thompson 6

Figure 8. Taux de croissance spécifique relatif des algues pendant toute l'année pour des enrichissements en phosphate de faible niveau 6

Illustrations (suite)

Page

Figure 9. Dilution des effluents de l'usine de pâte kraft dans la rivière Thompson d'après un calcul effectué en supposant que les effluents sont déversés à un débit constant, et en utilisant des débits de la Thompson mesurés à la Spences Bridge 7

Figure 10. Augmentation de la teneur en phosphore réactif soluble en aval du point de déversement des effluents de l'usine de pâte kraft dans la rivière Thompson 8

Figure 11. Biomasse algale viable en période de forte carence en phosphoreen fonction des apports de phosphore provenant des effluents del'usine de pâte kraft 8

Figure 12. Baisse prévue, en pourcentage, de la biomasse algale en fonction de la réduction en pourcentage du phosphore soluble disponible dans les effluents de l'usine de pâte à papier 9

Résumé

La première phase du programme de recherche en canal expérimental, réalisée conjointement par la Direction générale des eaux intérieures d'Environnement Canada et Weyerhaeuser Canada Ltd. en 1980–1981, a permis d'établir que les niveaux élevés de la biomasse algale dans la rivière Thompson en aval du lac Kamloops étaient attribuables à la présence de phosphore provenant de sources locales de déversement près de Kamloops. Ces premières comparaisons expérimentales des taux de croissance des algues dans les rivières North et South Thompson, ainsi que dans le cours inférieur de la rivière, ont indiqué qu'à des concentrations de phosphore réactif soluble de 3–4 ppb, les algues périphytoniques dans le cours inférieur de la rivière croissaient pratiquement au taux maximal possible pendant la période critique de la fin de l'hiver et du début du printemps.

Dans la seconde phase du programme, menée à Chase (C.-B.) au cours de la période 1984–1986, on a effectué des expériences détaillées sur des additions contrôlées de phosphore. Ces expériences ont clairement démontré que les taux de croissance des diatomées périphytoniques dans la rivière Thompson atteignent le point de saturation à des concentrations très faibles de phosphate (moins de 1 ppb). Des expériences sur l'accumulation de la biomasse algale à long terme, aussi réalisées au site expérimental de Chase, ont montré que la biomasse algale maximale atteinte dans des eaux en écoulement présente également une cinétique de saturation. Toutefois, la concentration de phosphate requise pour mener au point de saturation la biomasse viable de diatomées périphytoniques est de beaucoup supérieure (environ 30 ppb) à celle qui sature le taux de croissance cellulaire. Malgré la réponse continue de la biomasse algale à l'augmentation des niveaux d'addition de phosphore, la forme de la courbe de saturation de la biomasse montre qu'on ne peut s'attendre à ce qu'il existe une relation biunivoque entre l'extraction du phosphore et la réduction de la quantité d'algues.

En supposant que la concentration moyenne de phosphore directement disponible dans le cours inférieur de la rivière Thompson est accrue par l'effluent de l'usine de pâte à papier d'environ 2.5 ppb pendant la période de faible débit, on peut prévoir approximativement la réponse, en aval, de la biomasse algale qui pourrait résulter d'un pourcentage donné de réduction de la charge en phosphore. Une simple analyse des données sur la biomasse algale maximale pouvant être maintenue en réponse à des additions de phosphate révèle qu'une réduction de 50 % du phosphore provenant de l'effluent de l'usine procurerait une amélioration de moins de 20 % en aval. Pour obtenir une amélioration <<significative>> en aval, c'est-à-dire une réduction de 60 % de la biomasse algale, il faudrait extraire au moins 90 % du phosphore soluble disponible dans l'effluent. Ce résultat montre qu'il ne serait pas rentable de déployer des efforts additionnels pour extraire le phosphore de l'effluent de l'usine, dans l'intention de lutter contre la formation d'algues en aval. En outre, selon des observations faites récemment, le degré de <<nuisance>> des algues qu'on signalait dans les années 1970 n'est plus le même aujourd'hui, de sorte qu'il ne serait peut-être même pas nécessaire de prendre d'autres mesures de contrôle des éléments nutritifs dans l'avenir.

Abstract

The first phase of the experimental trough research program undertaken jointly by the Inland Waters Directorate of Environment Canada and Weyerhaeuser Canada Ltd. during 1980–81 established that the higher algal biomass levels in the Thompson River downstream from Kamloops Lake were caused by phosphorus originating from point source discharges near Kamloops. These early experimental comparisons of algal growth rates in the North, South and lower Thompson rivers indicated that at soluble reactive phosphorus concentrations of 3–4 ppb, periphytic algae in the lower Thompson River were growing at or near the maximum rate possible during the critical late winter—early spring period.

The second phase of the program consisted of extensive controlled phosphorus addition experiments conducted at Chase, B.C., during 1984–86. These experiments have conclusively established that the growth rates of periphytic diatoms in the Thompson River saturate at very low phosphate concentrations (at less than 1 ppb). Long-term algal biomass accumulation experiments, also conducted at the Chase experimental site, have shown that the maximum biomass of algae attained in flowing water also shows saturation kinetics. However, the concentration of phosphate required to saturate the sustainable standing crop of periphytic diatoms is considerably higher (about 30 ppb) than that which saturates cellular growth rate. In spite of continued algal biomass response with higher levels of P-addition, the shape of the biomass saturation curve means that a one-for-one, removal of phosphorus vs. reduction of algae is not expected.

Assuming that the average concentration of readily available phosphorus in the lower Thompson River is elevated by the pulpmill effluent by about 2.5 ppb during the low flow period, it is possible to predict roughly the downstream response in algal biomass that might result from a given percentage reduction in P-loading. Using data on the maximum sustainable algal biomass in response to phosphate additions, a simple analysis indicates that a 50% reduction in phosphorus from the mill effluent would result in less than a 20% improvement downstream. To achieve a "significant" improvement downstream, i.e., a 60% reduction in algal biomass, at least 90% of the available soluble phosphorus in the effluent would have to be removed. This finding suggests that additional efforts to control downstream algae by removing phosphorus from the pulpmill effluent would be relatively ineffective. Furthermore, recent observations that the "nuisance" levels of algae reported in the 1970's are no longer present suggest that additional nutrient control measures in the future may not even be necessary.

Remerciements

Le financement de ce projet a été assuré conjointement par Environnement Canada et Weyerhaeuser Canada Ltd. M. Bolin, R. Mitchell et K. Susuki ont fourni les services techniques. Le terrain dont nous avons disposé pour les expériences est une courtoisie du village de Chase. Nous voudrions aussi remercier L. Adamache qui nous a soutenu sur le plan administratif et qui n'a pas ménagé ses encouragements.

Régulation de la production et de la biomasse algales par le phosphore dans la rivière Thompson, Colombie-Britannique

M.L. Bothwell, S. Jasper et R.J. Daley

HISTORIQUE

Après l'ouverture de l'usine de pâte de la Weyerhaeuser Canada Ltd. à Kamloops, vers la fin des années 1960, la détérioration de la qualité de l'eau dans la rivière Thompson, en aval du lac Kamloops, a suscité de nombreuses plaintes, tant de la part du public que de celle des biologistes s'occupant des pêches de la région. On se préoccupait surtout des points suivants : l'odeur et le goût anormaux de la chair des poissons, la coloration de l'eau de la rivière et la formation d'écume et enfin, l'accumulation de quantités massives de matière algale sur les pierres. Un groupe d'étude fédéral-provincial chargé d'examiner ces questions a été créé en 1973; il a été conclu que les deux premiers points mentionnés n'étaient pas vraiment étayés par des données scientifiques bien établies ou qu'ils portaient essentiellement sur des aspects d'ordre esthétique, c'est-à-dire qu'ils ne semblaient pas être d'une importance majeure au point de vue écologique. Par contre, la pullulation des algues était un fait scientifiquement bien étayé et pouvait comporter un risque tant pour les pêcheurs (pierres glissantes) que pour les poissons (épuisement de l'oxygène dans les espaces entre les pierres). Dans son rapport final, présenté en 1976, le groupe d'étude attribue la surabondance d'algues dans le cours inférieur de la rivière Thompson au phosphore présent dans les effluents de la Weyerhaeuser et de l'usine d'épuration de Kamloops. Par conséquent, en 1976, la ville de Kamloops a commencé à retenir ses effluents en hiver et a ajouté un traitement tertiaire au processus d'épuration. Grâce à ces mesures, la quantité de phosphore rejetée dans la rivière Thompson par des sources ponctuelles a été réduite de la moitié au moins. Cependant, bien qu'en aval du lac Kamloops les fleurs d'eau aient un peu perdu de leur ampleur vers la fin des années 1970 et au début des années 1980, le problème n'a pas été résolu.

Le groupe d'étude a présenté des preuves très convaincantes que le phosphore est la cause des infestations algales, mais elles étaient indirectes et circonstantielles. En 1976, rien ne permettait de prouver directement qu'en aval des sources de P dans la rivière Thompson, les algues périphytoniques étaient physiologiquement plus riches en phosphore ou qu'elles se développaient vraiment plus rapidement que celles des eaux d'amont. Il fallait éclaircir ces deux grandes questions avant de pouvoir affirmer de façon raisonnablement définitive que les accumulations de matière algale dans le cours inférieur de la Thompson au début des années 1970 étaient dues à des rejets de P de sources ponctuelles dans la région de Kamloops.

En 1979, on a proposé des expériences pour régler ces deux questions clés. En automne de la même année, l'Institut national de recherche sur les eaux (INRE) d'Environnement Canada et la Weyerhaeuser Canada Ltd. concluaient une entente pour financer ensemble un projet de recherche dans ce but. Durant les hivers de 1980 et 1981, des travaux de recherche ont été réalisés dans des canaux expérimentaux aménagés sur les berges de la North Thompson, de la South Thompson et du cours inférieur de la rivière Thompson. Ces canaux permettaient de comparer simultanément le taux de croissance et la physiologie du phosphore dans ces trois cours d'eau en conditions physiques contrôlées (Bothwell et Daley, 1981; Bothwell, 1983; Bothwell et Jasper, 1983; Bothwell, 1985). Les résultats de ces expériences ont confirmé la conclusion énoncée dans le rapport du groupe d'étude de 1976, c'est-à-dire que le phosphore était de fait la cause de la surabondance d'algues dans la rivière Thompson. Ils montraient aussi pour la première fois que 1) les concentrations de phosphore soluble étaient toujours plus élevées en aval du lac Kamloops que dans les deux tributaires d'amont et 2) que les algues périphytoniques dans les eaux d'aval avaient une réaction physiologique à cette

abondance de phosphore et se développaient plus rapidement.

Malgré la forte relation qu'on a établie entre les apports de P et la pullulation des algues en aval, il n'était toujours pas possible au début des années 1980 de prévoir dans quelle mesure la situation pouvait s'améliorer (réduction de la biomasse algale) par suite d'une réduction des apports. (À l'évidence, on fait ici exception de l'hypothèse où tous les apports de P dus à des activités humaines seraient éliminés. Le cas échéant, il y aurait une amélioration de 100 %, c'est-à-dire que, tous les autres facteurs restant inchangés en aval, l'abondance des algues ne devrait pas être différente de ce qu'elle était avant que les eaux soient enrichies.) La prévision des effets d'une réduction partielle des apports de phosphore est difficile, notamment parce que la relation entre la croissance des algues et la concentration de phosphore dans les eaux courantes est une fonction hyperbolique rectangulaire. La plupart des réactions biologiques correspondent à une courbe de saturation de ce genre. Pour évaluer la rentabilité de la déphosphoration des effluents de la Weyerhaeuser Canada, il fallait déterminer la nature des relations mises en jeu. À cette fin, Environnement Canada et la Weyerhaeuser Canada Ltd. ont conclu une autre entente de collaboration en 1983. Les deux parties s'engageaient par ce nouveau contrat à financer des expériences sophistiquées d'enrichissement au phosphore qui ont été réalisées de 1984 à 1986 dans des installations de canaux expérimentaux (EXTRA) situées près de Chase en Colombie-Britannique (figure 1).

Ci-après, on résume les principaux résultats de la dernière partie du projet de recherche sur la régulation de la production algale par le phosphore dans la rivière Thompson. On ne traite que des expériences touchant l'évaluation du traitement tertiaire (déphosphoration) des effluents de Weyerhaeuser Canada Ltd. comme moyen d'atténuer le <<problème>> des algues en aval du lac Kamloops. Les termes de nature technique qui reviennent fréquemment dans ce rapport sont définis dans le glossaire présenté à la fin.

RÉSULTATS ET DISCUSSION

Taux de croissance des diatomées périphytoniques

Suivant l'une des principales conclusions tirées des expériences comparatives de 1980 et 1981, le taux de croissance des diatomées périphytoniques atteint un point de saturation à faible concentration de phosphate (Bothwell, 1985). On en est arrivé à cette conclusion en se basant sur un nombre limité d'observations sans connaître précisément la concentration réelle d'orthophosphate dans l'eau des rivières. Néanmoins, certaines données, surtout d'ordre physiologique [activité phosphatasique alcaline (APA), rapports N/P et C/P cellulaires] indiquent que le taux de croissance des algues dans le cours inférieur de la rivière Thompson semblait atteindre ou approcher une valeur maximale, même si la concentration de phosphore réactif soluble n'était que de 3–4 ppb.

Cette conclusion est maintenant confirmée et l'on en a formellement prouvé la justesse. En fait, les concentrations de phosphate auxquelles le taux de croissance atteint le point de saturation sont beaucoup plus basses qu'on ne l'avait prévu auparavant. En 1984 et 1985, on a réalisé 10 expériences d'enrichissement en P à raison de 0.1,

Figure 1. Emplacement des canaux expérimentaux (EXTRA) aménagés près de l'émissaire du lac Little Shuswap, dans le centre-sud de la Colombie-Britannique.

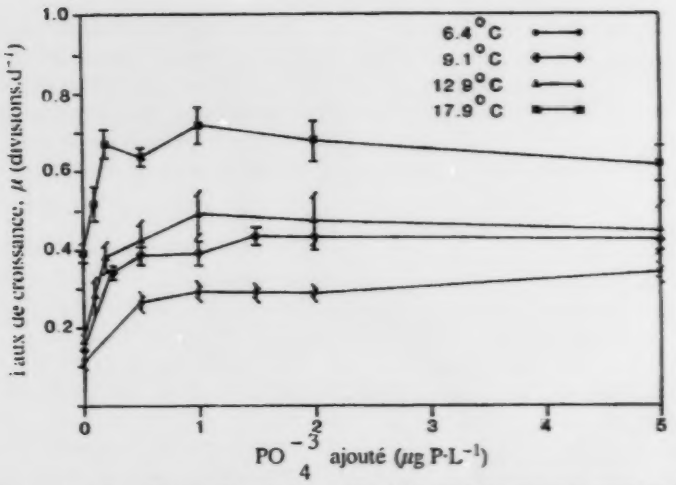

Figure 2. Taux de croissance (μ) des diatomées de la rivière South Thompson exprimé en divisions par jour en fonction de l'enrichissement en phosphate à différentes températures (c.-à-d., à différentes époques de l'année).

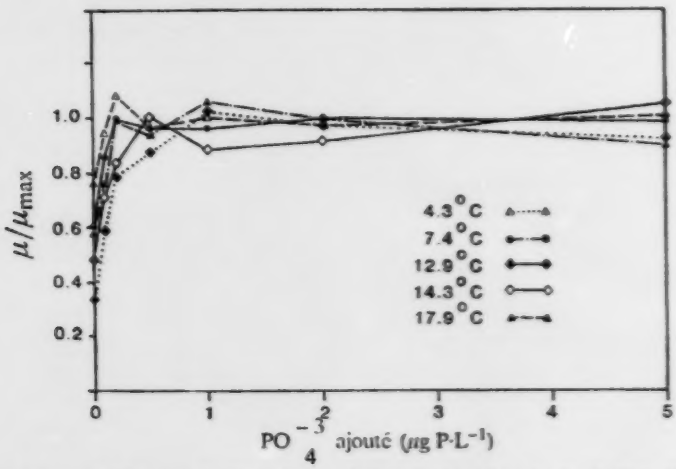

Figure 3. Taux de croissance spécifique relatif (μ/μ_{max}) des diatomées de la rivière South Thompson en fonction de l'enrichissement en phosphate à différentes températures (c.-à-d., à différentes époques de l'année).

0.2, 0.5, 1.0, 2.0 et 5.0 ppb d'orthophosphate (P) : dans tous les cas, le taux de croissance spécifique (μ = nombre de divisions par jour) des communautés d'algues atteignait le point de saturation à moins de 1.0 ppb (Bothwell, 1988). L'hyperbolisme rectangulaire de la courbe du taux de croissance en fonction de la concentration de P à différentes époques de l'année est bien évident (figure 2). Dans toutes les courbes, le point de saturation correspond à une faible concentration de phosphore, mais le taux de croissance maximal (μ_{max}) mesuré à différentes époques de l'année varie : les différences saisonnières sont en grande partie déterminées par la température, c'est-à-dire qu'à une température élevée, les taux de croissance à haute concentration de phosphore sont plus élevés (figure 2).

Si l'on normalise les taux de croissance spécifiques d'après μ_{max} observé dans chaque expérience et si l'on trace une courbe en fonction de la concentration de phosphate, on constate que toutes les courbes semblent identiques tout au long de l'année (figure 3). Ainsi, au point de vue de la croissance spécifique relative (μ/μ_{max}), les algues réagissent à l'enrichissement en P de la même façon tout au long de l'année : c'est là une nouvelle confirmation que la normalisation de μ d'après

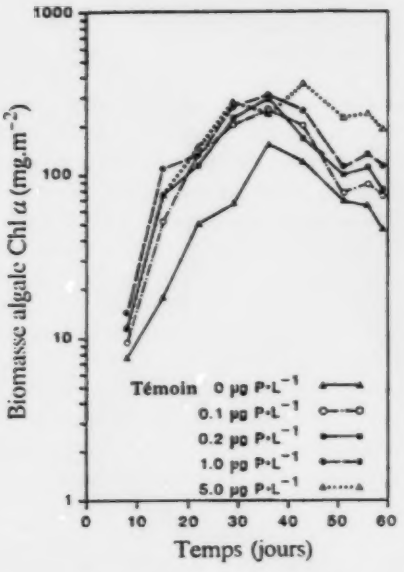

Figure 4. Courbes de la biomasse périphytonique en fonction du temps à différents régimes d'enrichissement en phosphate, dans l'une des expériences à long terme (oct.–déc. 1984).

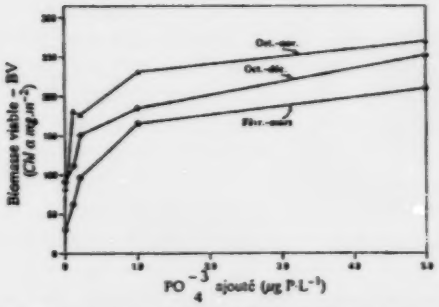

Figure 5. Biomasse algale viable (BV) en fonction de l'enrichissement en phosphate au cours des trois expériences à long terme.

μ_{max} estompe les principaux effets des facteurs physiques qui déterminent le taux de croissance.

Régulation de la biomasse algale par le phosphore

La plupart des expériences étaient centrées sur l'effet du phosphore sur le taux de croissance des algues, car on croyait que la seule façon dont un élément nutritif comme le phosphore peut déterminer des changements de biomasse algale dans un cours d'eau est d'influer sur le taux de croissance des algues. Néanmoins, dans cette étude on avait essentiellement pour but de déterminer comment le phosphore influe sur la biomasse algale. Afin d'étudier ce phénomène directement, on a réalisé trois études à long terme dans des canaux ouverts pour savoir comment la concentration de phosphore influe sur la biomasse algale de la zone et pour voir si la relation mise en jeu diffère beaucoup des relations observées entre la concentration de phosphore et le taux de croissance.

À la figure 4, on voit les changements de biomasse algale en fonction du temps tels qu'on les a observés au cours d'une des expériences à long terme (59 jours, oct.–déc. 1984) mentionnées précédemment. Lors de cette expérience, la biomasse a augmenté de façon exponentielle pendant deux semaines environ, puis, après avoir atteint un sommet, elle a commencé à diminuer. La relation entre la concentration de P et la biomasse de la zone a été évaluée de deux façons. Premièrement, on a établi une relation entre les niveaux d'éléments nutritifs et la biomasse viable (BV). Pour chaque addition de P et ce pour toutes les expériences, la BV a été estimée en faisant la moyenne des valeurs supérieures de Chl *a* vers la fin de chacune des expériences. La valeur BV la plus élevée observée au cours de chacune des expériences a été désignée biomasse viable maximale (BV_{max}) et a servi à normaliser les autres valeurs.

Deuxièmement, les niveaux d'éléments nutritifs ont été reliés à la biomasse de pointe (BP) seulement observée au cours de chacune des expériences. La BP la plus élevée observée au cours de chacune des expériences a été désignée biomasse de pointe maximale (BP_{max}). Les réactions traduites par les rapports BV/BV_{max} et BP/BP_{max} à l'enrichissement en P étaient semblables. Pour cette raison, et pour des raisons de simplification, seules les données sur la BV sont présentées dans le présent rapport.

La validité de ces expériences sur la relation entre la BV et la concentration en P se trouve renforcée par le fait que les courbes de la BV montrent une saturation à des concentrations de P plus élevées (figure 5). Comme ce fût le cas pour les courbes du taux de croissance spécifique, on a obtenu des courbes différentes à différentes époques de l'année. Les courbes de la BV différaient toutefois des courbes du taux de croissance spécifique à un égard très important : le point de saturation n'est pas atteint à une faible concentration de phosphore. En effet, la biomasse continue d'augmenter jusqu'à 5 ppb et même au-delà de cette valeur. Dans une expérience (oct.–nov. 1985), on a enrichi le milieu en y ajoutant du

phosphate à des concentrations variables allant jusqu'à 100 ppb; la biomasse a augmenté jusqu'à 25–50 ppb (figure 6A). Si l'on reporte les mêmes valeurs sur échelle semi-logarithmique (figure 6B), on observe une relation log-linéaire entre la concentration de phosphore et la BV avec un point de saturation qui se situe à près de 30 ppb.

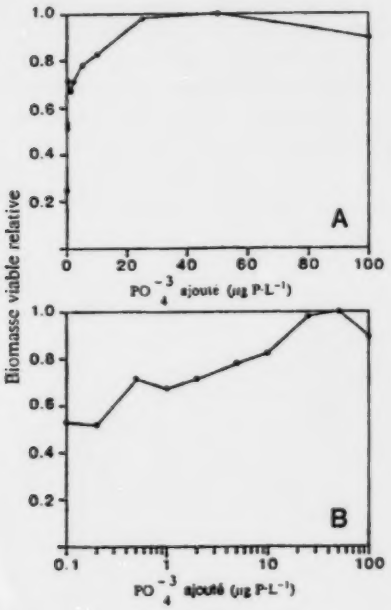

Figure 6. Biomasse algale viable relative (BV/BV_{max}), en fonction de l'enrichissement en phosphate (jusqu'à 100 ppb) durant une des expériences à long terme (oct.-nov. 1985). A — L'enrichissement en phosphate est reporté sur échelle linéaire. B — Mêmes données qu'en A, mais l'enrichissement en phosphate est reporté sur échelle logarithmique.

On peut fournir une explication simple à la disparité entre les concentrations de P saturantes pour μ/μ_{max} et BV/BV_{max}. Bien que les taux de croissance des cellules individuelles et des minces pellicules de périphyton présentent une saturation à des concentrations de phosphore faibles, il n'en est pas de même pour la croissance de la communauté dans son ensemble. Au fur et à mesure que la population d'algues se fait plus dense, les cellules au centre de la matte peuvent présenter une carence en P, tandis que les cellules situées plus près de la surface de la matrice de périphyton continuent à être suffisamment alimentées en P. Ainsi, les concentrations plus élevées de phosphore dans les eaux superficielles devraient accroître les taux de croissance des cellules situées plus profondément dans la matrice en augmentant le taux d'approvisionnement en ce qui a trait à l'élément nutritif limitant.

Caractère saisonnier de la carence en phosphore

Les effets de l'enrichissement en P sur le rapport μ/μ_{max} illustré à la figure 3 semblent être les mêmes tout au long de l'année; cette constatation soulève une difficulté du fait qu'elle indiquerait que la teneur de base en phosphore dissous des eaux de la South Thompson ne varie pas de façon saisonnière. Or, cette constatation ne concorde pas avec les résultats des mesures de phosphore réactif soluble (PRS) et de phosphore dissous total (PDT) prises en 1980–1981 dans le réseau hydrographique de la rivière Thompson ni avec les données recueillies sur l'APA périphytonique; en effet, dans tous ces cas, l'analyse indique qu'il y aurait moins de phosphore disponible au printemps qu'en hiver (Bothwell et Daley, 1981; Bothwell, 1985). Bien qu'aucune variation saisonnière n'ait été décelée dans les concentrations de PRS mesurées dans la South Thompson à Chase en 1984–1985 (Bothwell, 1988), les données sur l'APA nous font voir nettement des tendances temporelles qui concordent avec les constatations antérieures, indiquant une carence en phosphore beaucoup plus forte vers la fin de l'hiver et durant l'été qu'en automne et au début de l'hiver (figure 7).

On pourrait voir une contradiction entre la figure 3 indiquant que la teneur de base en P disponible dans les eaux de la South Thompson serait la même à différentes époques de l'année, et la figure 7 (courbe de l'APA) indiquant exactement le contraire. Cette disparité s'explique par l'échelle utilisée pour tracer la figure 3. En fait, les changements du taux de croissance relatif déterminés par l'addition de très petites quantités de phosphates sont différents tout au long de l'année. La figure 8 le démontre très bien. Dans ce diagramme réalisé à partir des expériences de 1984–1985, seuls les rapports μ/μ_{max} déterminés pour les témoins et les cas d'enrichissement en P les plus faibles sont donnés. Le taux de croissance spécifique relatif des algues du canal témoin (où l'on n'a pas ajouté de phosphore) varie de façon saisonnière. Les valeurs maximales, qui dénotent une faible carence en phosphore, ont été mesurées en automne et au milieu de l'hiver, tandis que les valeurs basses (forte carence en phosphore) ont été mesurées du début du printemps jusqu'à la fin de l'été. Lorsqu'on ajoute de très petites quantités de phos-

phate (moins de 0.1 ppb) dans un milieu qui n'est pas très pauvre en P, le taux de croissance des algues atteint un point de saturation. En milieu plus pauvre en phosphore, il faut un enrichissement en phosphate à une concentration de 0.5 ppb ou plus pour que le taux de croissance atteigne un point de saturation (figure 8). On peut déduire que la teneur de base en phosphore facilement accessible dans la South Thompson varie de façon saisonnière (Bothwell, 1988). D'après les données recueillies lors des expériences comparatives de 1980–1981 (Bothwell et Daley, 1981; Bothwell, 1985), il se produirait aussi des changements saisonniers du même genre dans la North Thompson. C'est un fait qu'il est important de connaître pour déterminer à quelle époque de l'année les algues réagissent le plus à un apport de P.

L'APA des algues témoins peut être un indicateur du degré de carence en phosphore des eaux. Si l'on considère qu'une valeur inférieure à 100 nmoles·μg^{-1} Chl $a \cdot h^{-1}$ dénote une faible carence en P, on peut en déduire que d'octobre à janvier à peu près, les algues réagissent moins aux apports de P qu'aux époques où l'APA dépasse 100 unités, soit à peu près de février à août (figure 8). L'époque où ces phénomènes se produisent varie d'une année à l'autre, mais dans l'ensemble, le cycle reste probablement le même.

Le débit des eaux est un autre facteur important qui influe sur l'accumulation d'algues. Habituellement dans la rivière Thompson, les algues s'accumulent au point de causer des problèmes seulement en période d'étiage, lorsque le débit est

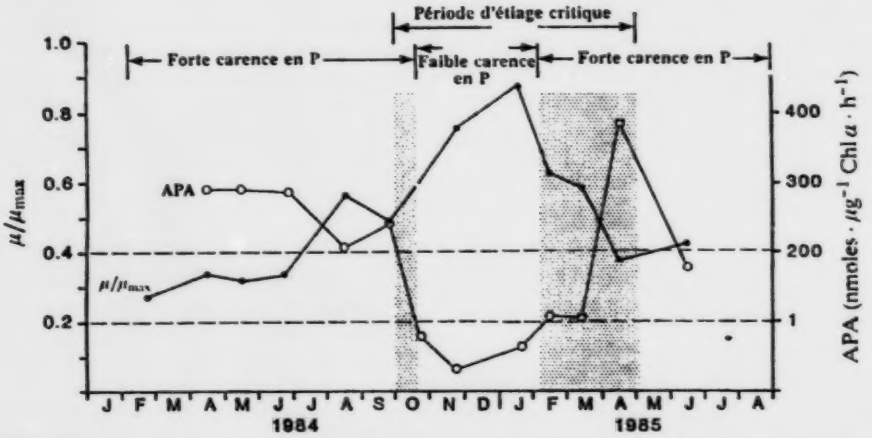

Figure 7. Changements saisonniers du taux de croissance spécifique relatif et de l'activité phosphatasique alcaline (APA) des algues périphytoniques de la rivière South Thompson. Les périodes d'étiage critique et de forte carence en phosphore sont indiquées. Les zones hachurées correspondent aux périodes de l'année où ces deux conditions sont réunies.

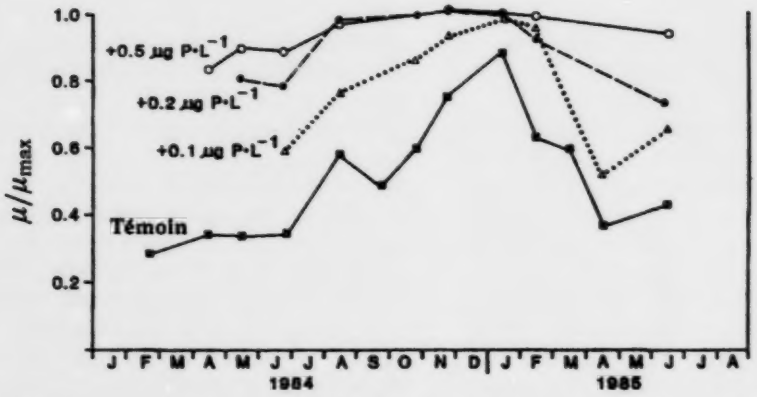

Figure 8. Taux de croissance spécifique relatif des algues pendant toute l'année pour des enrichissements en phosphate de faible niveau.

stable. En outre, en période de faible débit, l'élévation de la concentration de P due aux sources ponctuelles est plus marquée du simple fait que le facteur de dilution est plus faible. Dans la rivière Thompson, la période d'étiage critique va habituellement d'octobre jusqu'en avril (figure 7). Les périodes où le régime d'étiage critique coïncide avec une forte carence en phosphore sont indiquées par les zones hachurées dans la figure 7. La rivière est surtout sensible à la pollution par le phosphore à deux époques de l'année : durant une courte période en automne (octobre) et durant une période plus longue, de février à avril.

Prévision de la réaction des algues à la déphosphoration

Pour ceux qui, en gestion de l'environnement, s'intéressent aux éléments nutritifs et à l'eutrophisation, l'abondance des algues accumulées sur les pierres de la rivière est le point le plus important à considérer. Pour cette raison, et aussi à cause de la différence entre les variations de taux de croissance spécifique et de la biomasse viable déterminées par l'enrichissement en P, seules les courbes de la BV sont utilisées à des fins de prévision.

Différentes courbes de BV ont été obtenues à différents moments de l'année (figure 5). Parce que le milieu est plus sensible à l'apport en P lorsque la carence en cet élément est plus grande, les données sur la BV correspondant à la période de forte carence en P ont été utilisées pour prévoir la réduction potentielle de la biomasse algale dans la rivière résultant de l'élimination du P dans les effluents de la société Weyerhaeuser Canada Ltd. Cette façon de procéder devrait donner une évaluation très généreuse de l'influence de l'apport en phosphore sur la rivière à d'autres époques de l'année.

Pour estimer l'effet d'une éventuelle réduction des apports en phosphore, il faut savoir quelles quantités sont déversées à l'heure actuelle dans la rivière. Dans la figure 9, on peut voir la courbe de dilution des effluents de l'usine de pâte kraft (EPK) rejetés dans la rivière Thompson; pour tracer cette courbe, on a supposé que les effluents étaient déversés à débit constant, à raison de 1.68 $m^3 \cdot s^{-1}$ (J. Zagar, Weyerhaeuser Canada Ltd., comm. pers.) et l'on a utilisé les débits mensuels de la Thompson mesurés à Spences Bridge (Environnement Canada, 1983). D'après les résultats des tests chimiques et des épreuves radiobiologiques, on estime à environ 300 ppb la concentration de phosphore dissous facilement accessible dans les EPK (Jasper et Bothwell, 1986). En utilisant la valeur de 300 ppb pour la teneur en PRS dans les EPK et la courbe de dilution présentée dans la figure 9, on peut calculer l'augmentation de la concentration de phosphore soluble disponible dans la rivière Thompson (figure 10). Les augmentations calculées du PRS pour la période d'étiage concordent très bien avec celles que l'on a observées dans le cours inférieur de la Thompson durant l'hiver de 1980–1981 (figure 10; Bothwell, 1985). Si l'on tient compte des variations et des erreurs de mesure qui ont influé sur tous ces paramètres, de même que des nombreuses suppositions simplificatrices qui sont intervenues dans les calculs, la contribution des EPK actuels à l'augmentation de la teneur en PRS dans la rivière Thompson serait, selon la meilleure estimation possible, d'environ 2.5 ppb.

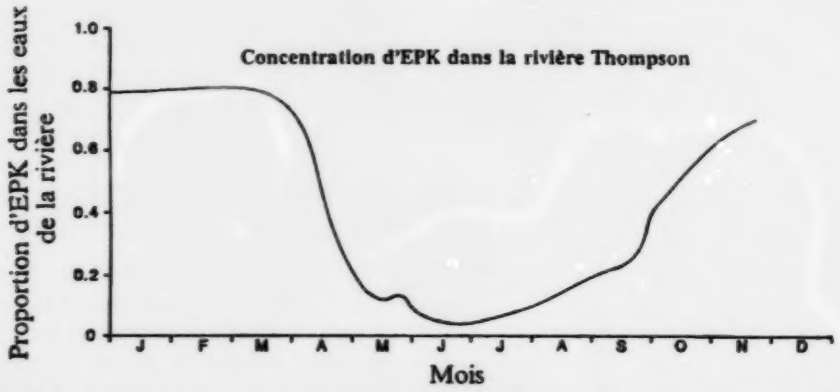

Figure 9. Dilution des effluents de l'usine de pâte kraft (EPK) dans la rivière Thompson d'après un calcul effectué en supposant que les effluents sont déversés à un débit constant de 1.68 $m^3 \cdot s^{-1}$, et en utilisant des débits de la Thompson mesurés à la Spences Bridge.

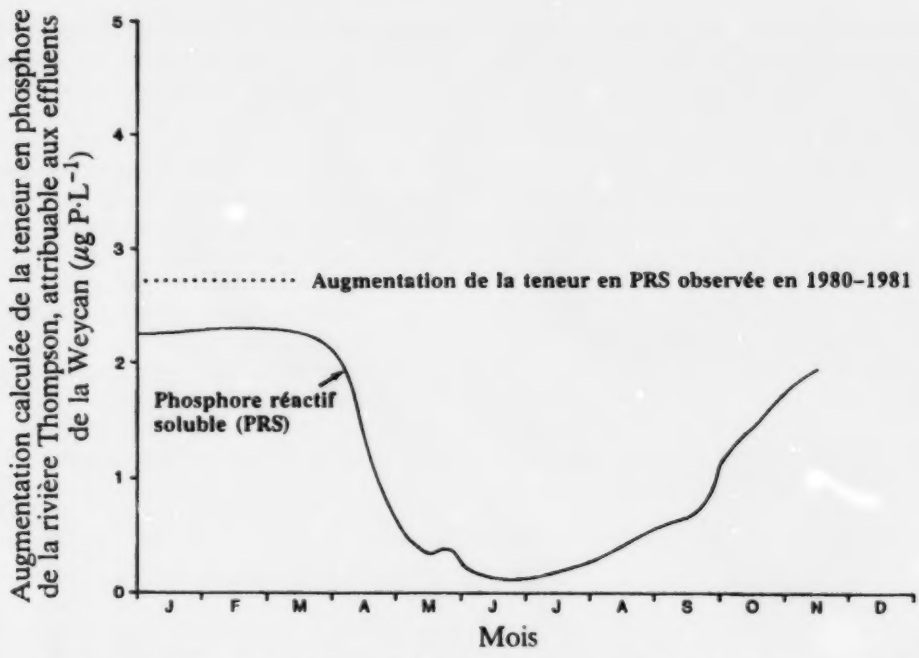

Figure 10. Augmentation de la teneur en phosphore réactif soluble (PRS) en aval du point de déversement des effluents de l'usine de pâte kraft dans la rivière Thompson. Pour les calculs, on a utilisé la courbe de dilution de la figure 9 et supposé que la teneur moyenne en PRS des effluents était de 300 ppb.

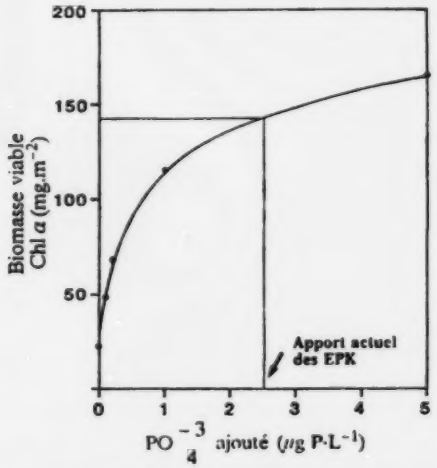

Figure 11. Biomasse algale viable en période de forte carence en phosphore (fév.–mars) en fonction des apports de phosphore provenant des effluents de l'usine de pâte kraft (EPK). La biomasse algale attribuable aux déversements actuels des EPK est indiquée.

Les données sur la BV provenant de l'expérience à long terme sur l'accumulation de la biomasse mesurée en période de forte carence en P (fév.–mars, 1984) sont reportées sur la figure 11, après lissage. On peut voir sur ce graphique qu'avec les EPK actuels, la biomasse algale viable passe de 22.3 mg Chl $a \cdot m^{-2}$ à 142.4 mg Chl $a \cdot m^{-2}$. En supposant que la première de ces deux valeurs représente la densité de base naturelle des populations d'algues et que la seconde correspond à la densité actuelle augmentée par suite de l'apport en P provenant des EPK, on peut calculer l'amélioration relative que produirait une réduction donnée des apports de phosphore. La figure 12 constitue la représentation graphique de ce calcul : si l'apport de P soluble en provenance de l'usine de pâte était réduit de 50 %, la réduction de la biomasse algale en aval serait de moins de 20 %. Pour induire une réduction importante, c'est-à-dire une baisse de la biomasse algale de 60 %, il faudrait que les apports actuels de PRS provenant des EPK soient réduits de 90 %.

Ces calculs reposent sur un grand nombre de suppositions dont l'une des plus importantes est la validité de l'extrapolation par laquelle on a appliqué les observations faites en canal expérimental à l'ensemble de l'écosystème d'un cours d'eau. Au cours des expériences réalisées dans les installations EXTRA, on observe différents facteurs ayant

pour effet de nous faire surestimer ou sous-estimer l'effet des éléments nutritifs. Dans la première catégorie, on pense surtout à la faible pression de broutage à laquelle est soumise la biomasse algale dans les canaux expérimentaux comparativement à ce qui se passe probablement dans la rivière. Dans la seconde catégorie, on pense surtout à la reconnaissance implicite que dans les eaux d'aval, la diminution du phosphore dissous est minime (Bothwell et Daley, 1981). Si une diminution importante survient, le milieu sera plus sensible à l'apport en P que ne l'indique la figure 12.

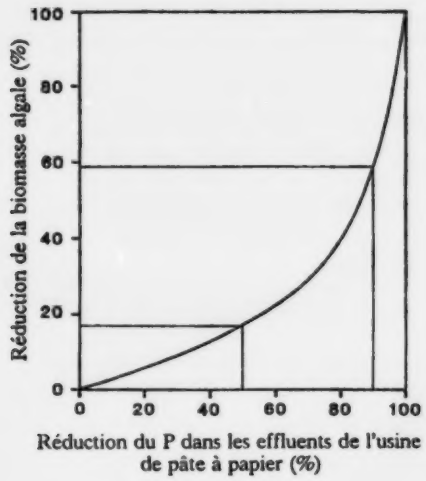

Figure 12. Baisse prévue, en pourcentage, de la biomasse algale en fonction de la réduction en pourcentage du phosphore soluble disponible dans les effluents de l'usine de pâte à papier.

En dépit de ces réserves, la présente tentative pour prévoir les conséquences environnementales d'une modification de l'abondance d'un élément nutritif dans un cours d'eau est fondée sur les meilleures données scientifiques connues. Dans la mesure du possible, on a utilisé des estimations prudentes dictées par le souci de la protection de l'environnement. Par exemple, on a supposé que la teneur de base en phosphore à l'endroit où les effluents de l'usine de pâte kraft se jettent dans la rivière Thompson est aussi faible que la teneur mesurée dans la South Thompson près de Chase. Or, d'après les données recueillies en 1980–1981, les concentrations de base dans la North Thompson sont plus élevées que la South Thompson; la combinaison des deux devrait donc donner une concentration plus élevée que dans le tributaire sud seulement.

Un autre facteur important dont il faut tenir compte dans la prise de décisions concernant les futures mesures de régulation des éléments nutritifs dans la rivière Thompson, c'est que l'on n'observe plus depuis un certain temps les infestations massives d'algues comme on en voyait souvent dans les années 1970. Bien que cette situation reste inexpliquée, il est possible que les communautés d'invertébrés de la rivière se soient adaptées à des niveaux de production plus élevés et qu'elles soient mieux en mesure de limiter la population d'algues. Un examen plus poussé des communautés d'invertébrés de la rivière pourrait peut-être apporter une réponse à cette question importante.

RÉFÉRENCES

Bothwell, M.L. 1983. All-weather troughs for periphyton studies. Water Res., 17: 1735-1741.

Bothwell, M.L. 1985. Phosphorus limitation of lotic periphyton growth rates: An intersite comparison using continuous-flow troughs (Thompson River system, British Columbia). Limnol. Oceanogr., 30: 527-542.

Bothwell, M.L. 1988. Growth rate responses of lotic periphytic diatoms to experimental phosphorus enrichment: The influence of temperature and light. Journal canadien des sciences halieutiques et aquatiques. 45: 261-270.

Bothwell, M.L., et R.J. Daley 1981. Determination of phosphorus sufficiency and growth rates of benthic algae in the Thompson River, B.C. using experimental flowing troughs. Rapport régional de la DGEI. 32 pp.

Bothwell, M.L., et S. Jasper. 1983. A light and dark trough methodology for measuring rates of lotic periphyton settlement and net growth: An evaluation through intersite comparison. Dans Periphyton of freshwater ecosystems. R.G. Wetzel, éd. Junk, pp. 253-265.

Jasper, S., et M.L. Bothwell. 1986. Effects of kraft pulp mill effluent on periphyton in experimental continuous-flow troughs (Thompson River, British Columbia). Rapport inédit.

Glossaire

activité phosphatasique alcaline (APA) : Activité d'une enzyme que produisent de nombreuses cellules microbiennes en réaction à une insuffisance de phosphore. Si l'APA est élevée, les cellules manquent de P, tandis que si elle est basse, elles en ont suffisamment.

biomasse viable (BV) : La moyenne des valeurs les plus élevées de la quantité de chlorophylle à la fin de chaque expérience est utilisée comme mesure de la quantité maximale d'algues qui peuvent exister par unité de surface, dans les conditions expérimentales.

biomasse viable maximale (BV_{max}) : La valeur de la biomasse viable la plus élevée en fonction de l'enrichissement observée au cours de chaque expérience est désignée biomasse viable maximale et sert à normaliser les autres valeurs.

chlorophylle (Chl *a*) : Pigment végétal qui sert à mesurer la biomasse algale.

orthophosphate : Forme moléculaire sous laquelle le phosphore est le plus facilement assimilé par les micro-organismes.

phosphore réactif soluble (PRS) : Formes de phosphore dissous dans l'eau qu'on peut mesurer par des techniques de dosage chimique standard ne nécessitant aucun processus de digestion. On présume qu'il s'agit en grande partie d'orthophosphate.

taux de croissance spécifique (μ) : Nombre de divisions par jour d'une cellule microbienne. On mesure ainsi à quel rythme les cellules se multiplient indépendamment de leur nombre.

taux de croissance spécifique maximal (μ_{max}) : Taux de division maximal des cellules dans des conditions de restriction dues aux facteurs physiques du milieu (p. ex., la température et la lumière). Dans ces conditions, la croissance cellulaire n'est limitée par aucune carence nutritive et les cellules se développent aussi rapidement que possible au point de vue biologique.

taux de croissance spécifique relatif (μ/μ_{max}) : Indice du degré de déficience nutritive des cellules. On divise le taux de croissance spécifique (μ) par le taux de croissance maximal spécifique (μ_{max}) dans les conditions physiques existantes.